

Estimasi Produksi Minyak dan Gas Bumi di Kalimantan Utara Menggunakan Metode *Cokriging*

Eka Oktaviana Romaji, I Nyoman Latra, Sutikno

Jurusan Statistika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: i_nyoman_1@statistika.its.ac.id, sutikno@statistika.its.ac.id, eka14.okta@gmail.com

Abstrak—Kegiatan manusia sangat bergantung pada minyak bumi dan gas alam. Seiring dengan terus meningkatnya konsumsi minyak dan gas bumi per tahun, maka perusahaan yang bergerak di bidang migas dituntut untuk dapat memenuhi kebutuhan migas tersebut dengan biaya produksi yang seminimal mungkin. Jika eksplorasi di lakukan di medan yang sangat sulit, karena cadangan migas di permukaan bumi sudah habis, maka pada tahapan ini memerlukan biaya yang relatif besar. Oleh karena itu diperlukan metode untuk mengetahui titik persebaran minyak dan gas bumi tanpa melalui tahap eksplorasi. Salah satu metode geostatistika yang dapat digunakan adalah metode *cokriging*. *Cokriging* merupakan metode untuk mengestimasi titik yang meminimalkan kesalahan estimasi dengan menggunakan korelasi silang antara dua variabel yakni variabel utama (primer) dan variabel tambahan (sekunder) serta memperhatikan aspek spasial. Untuk melihat keakuratan interpolasi dengan *cokriging* dapat dilihat nilai dari R^2 pada *cross validation*. Nilai R^2 yang dihasilkan untuk mengestimasi minyak dan gas bumi sebesar 99,7% dan 99,99%. Hasil estimasi produksi minyak bumi tertinggi sebesar 61.055 bbbls berada di lokasi sumur A19 dan hasil estimasi produksi minyak bumi terendah sebesar 26.702 bbbls yang berada di titik A12. Hasil estimasi produksi gas bumi tertinggi terdapat di titik A14 sebesar 165.095 mscf dan produksi gas bumi terendah berada di titik A12 sebesar 71.826 mscf.

Kata Kunci—Minyak Bumi, Gas Bumi, *Cokriging*, Kalimantan Utara.

I. PENDAHULUAN

Kegiatan manusia sangat bergantung pada minyak bumi dan gas alam. Minyak bumi dan gas alam menjadi sumber utama energi di dunia yaitu sekitar 65,5%, batu bara 23,5%, air 6% serta sumber energi lainnya [1]. Seiring dengan terus meningkatnya konsumsi minyak dan gas bumi per tahun, maka perusahaan yang bergerak di bidang migas dituntut untuk dapat memenuhi kebutuhan migas tersebut dengan biaya produksi yang seminimal mungkin. Hal ini dikarenakan biaya produksi migas tidak sebanding dengan harga minyak yang mengalami penurunan. Eksplorasi merupakan tahapan untuk mengestimasi atau menaksir letak dan jumlah cadangan endapan minyak dan gas bumi tersebut. Jika eksplorasi di lakukan di medan yang sangat sulit karena cadangan migas di permukaan bumi sudah habis maka pada tahapan ini memerlukan biaya yang relatif besar. Oleh karena itu salah satu upaya agar dapat meminimumkan biaya eksplorasi dengan metode estimasi kandungan titik. Metode estimasi kandungan titik yang sering digunakan oleh perusahaan minyak dan gas bumi di Kalimantan utara

yaitu dengan melakukan analisis terhadap sampel kandungan tanah atau jenis batuan yang ada di sekitar penambangan. Hasilnya berupa estimasi kadar kandungan bahan tambang yang terdapat di titik tersebut. Geostatistika didefinisikan sebagai metode yang membahas hubungan spasial atas beberapa variabel guna mengestimasi nilai variabel yang berada pada lokasi yang belum terobservasi [2]. *Cokriging* merupakan pengembangan dari ilmu geostatistika untuk mengestimasi titik yang meminimalkan kesalahan estimasi dengan menggunakan korelasi silang antara dua variabel yaitu variabel utama (primer) dan variabel tambahan (sekunder) serta memperhatikan aspek spasial. Berdasarkan metode estimasi yang telah digunakan oleh perusahaan yakni dengan memperhatikan faktor jenis batuan untuk mengetahui persebaran cadangan minyak bumi, maka pada penelitian ini akan dilakukan estimasi produksi minyak dan gas bumi dari titik sumur penambangan yang sudah ada sebelumnya untuk mendapatkan estimasi produksi minyak dan gas bumi di titik yang lain dengan metode *cokriging*. Penggunaan metode *cokriging* ini sangat sesuai jika digunakan untuk mengestimasi dua variabel yaitu variabel minyak dan gas bumi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bidang Ilmu Geostatistika

Geostatistika merupakan ilmu khusus yang mempelajari distribusi dalam ruang dengan menggabungkan beberapa disiplin ilmu meliputi teknik pertambangan, geologi, matematika dan statistika. Pada perkembangannya, geostatistika menggabungkan lebih dari banyak metode, teori dan teknik agar mampu menyelesaikan permasalahan-permasalahan dalam konteks spasial [3].

B. Stasioneritas

Metode *cokriging* dapat digunakan jika data geostatistik memenuhi asumsi stasioneritas atau homogenitas spasial. Jika data tidak memiliki kecenderungan terhadap *trend* tertentu atau data berada di sekitar rata-rata yang konstan tidak tergantung pada waktu dan variansnya maka, data telah stasioner. Jenis stasioner yang dapat digunakan pada data geostatistik terdapat tiga jenis yakni stasioner kuat, stasioner orde dua, dan stasioner lemah [4].

C. Variogram

Variogram merupakan ukuran variansi data yang memperhitungkan jarak. Variogram digunakan untuk menentukan jarak dimana nilai-nilai data pengamatan

menjadi tidak saling bergantung atau tidak ada korelasinya [5]. Parameter penyusun variogram yaitu range, sill, nugget dan rasio nugget-sill. Range adalah jarak atau lag pada saat variogram mencapai nilai sill. Sill adalah nilai variogram untuk jarak pada saat besarnya konstan, sill ini besarnya dapat sama dengan varians data. Nugget adalah nilai variogram dimana lag mendekati nol. Rasio nugget-sill digunakan untuk mengukur autokorelasi spasial (dependensi spasial) dari variabel teritorial. Terdapat dua jenis variogram yaitu variogram eksperimental dan variogram teoritis. Variogram eksperimental didapatkan berdasarkan hasil korelasi spasial antara dua data yang terpisah pada jarak (h) tertentu yang ditunjukkan pada persamaan (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)|h_{ij}=h} (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

z_i dan z_j merupakan pasangan data yang berlokasi pada x_i dan x_j sedangkan $N(h)$ adalah pasangan titik-titik data yang dapat dihubungkan oleh jarak h .

Variogram teoritis merupakan variogram yang tersusun menurut fungsi atau model tertentu sebagai pengganti variogram eksperimental. Terdapat dua jenis variogram teoritis yaitu variogram isotropi dan anisotropi. Variogram isotropi merupakan variogram yang nilainya bergantung pada jarak, sedangkan variogram anisotropi merupakan variogram yang nilainya bergantung pada arah dan jarak. Berikut jenis model dari variogram teoritis isotropi.

1) Model Spherical

Persamaan (2) menjelaskan model *spherical* sebagai berikut:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left\{ 1.5 \left(\frac{h}{r} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right\} ; h \leq r \\ C_0 + C ; h > r \end{cases} \quad (2)$$

dimana $C_0 + C$ adalah *sill*, C_0 adalah *nugget*, dan r adalah range. Sifat dari model *spherical* ini adalah linier pada jarak dekat origin, kemudian mendatar pada jarak yang jauh dan mencapai *sill* pada saat r .

2) Model Eksponensial

Pada model *eksponensial* terjadi peningkatan yang sangat curam dan mencapai nilai *sill* secara asimptotik dan dirumuskan pada persamaan (3).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-3h}{r} \right) \right\} ; h \neq 0 \quad (3)$$

3) Model Gaussian

Model *Gaussian* merupakan model bentuk kuadrat dari eksponensial yang menghasilkan bentuk parabolik pada jarak yang dekat. Model ini menggambarkan fenomena variabel yang bersifat kontinu secara ekstrim [6]. Model *Gaussian* dirumuskan pada persamaan (4).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-3h}{r} \right)^2 \right\} ; 0 < h < r \quad (4)$$

D. Metode Cokriging

Metode cokriging merupakan metode pendugaan yang meminimumkan varians dari kesalahan estimasi dengan menggunakan korelasi silang antara dua variabel yakni variabel utama (primer) dan variabel tambahan (sekunder) [7]. Estimasi cokriging merupakan kombinasi linier dari data variabel primer dan variabel sekunder yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\hat{u}_0 = \sum_{i=1}^n a_i u_i + \sum_{j=1}^m b_j v_j \quad (5)$$

dimana \hat{u}_0 adalah estimasi dari U pada lokasi 0; u_1, u_2, \dots, u_n adalah data variabel primer pada n lokasi terdekat; v_1, v_2, \dots, v_m adalah data variabel sekunder pada

x lokasi terdekat; a_1, a_2, \dots, a_n dan b_1, b_2, \dots, b_m adalah pembobot *cokriging* yang harus ditentukan.

Pembobot yang akan dicari pada *cokriging* harus memenuhi dua kondisi yakni pertama, pembobot harus menghasilkan estimasi yang tidak bias. Kedua, memiliki kesalahan varians yang minimum. Agar estimasi yang diperoleh tak bias maka jumlah pembobot pada suku pertama adalah 1 dan pada suku kedua adalah 0.

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \text{ dan } \sum_{j=1}^m b_j = 0 \quad (6)$$

Selanjutnya adalah mencari pembobot yang dapat meminimalisasi varians error dan memenuhi kondisi tidak bias pada persamaan (6). Untuk mendapatkan pembobot dengan kriteria tersebut, maka dilakukan dengan meminimalkan fungsi dua *constrain* dengan menggunakan metode pengganda Lagrange [8].

$$\text{Var}\{R\} = \mathbf{w}^t \mathbf{C}_z \mathbf{w} + 2\mu_1 \left(\sum_{i=1}^n a_i - 1 \right) + 2\mu_2 \left(\sum_{j=1}^m b_j \right) \quad (7)$$

dimana \mathbf{w} adalah vektor pembobot, \mathbf{C}_z adalah matrik kovarians dari \mathbf{z} , dan \mathbf{z} adalah vektor yang berisi variabel acak U pada n lokasi terdekat, dan variabel acak V pada m lokasi terdekat.

E. Cross-Variogram

Metode *cokriging* yang menggunakan dua variabel acak untuk interpolasi, sehingga jika ingin mengukur independensi spasial menggunakan *cross-variogram*. Berikut adalah rumus dari *cross-variogram* yang ditunjukkan pada persamaan (8).

$$\hat{\gamma}_{UV}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)|h_{ij}=\mathbf{h}} (u_i - u_j)(v_i - v_j) \quad (8)$$

F. Cross Validation

Cross validation digunakan untuk menguji keakuratan interpolasi. Pada penelitian ini *cross validation* dilakukan dengan metode LOOCV karena ukuran data pengamatan cukup kecil. Pada LOOCV, salah satu pasangan titik data untuk sementara dihapus dari kumpulan data pengamatan. Misalkan $(z_1(\mathbf{x}_1), z_2(\mathbf{x}_2))$ merupakan pasangan titik data pengamatan ke- N yang sementara dihapus. Kemudian dilakukan pengujian dengan metode *cokriging* pada $N-1$ data pengamatan sisa. Selanjutnya membandingkan nilai estimasi $\hat{z}(\mathbf{x}_i)$ dengan $z(\mathbf{x}_i)$ dari data pengamatan yang dihapus dengan R^2 . Semakin tinggi nilai R^2 menunjukkan bahwa nilai estimasi tidak jauh berbeda dengan nilai aktual. Berikut rumus menghitung R^2 yang ditunjukkan pada persamaan (9).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (z(\mathbf{x}_i) - \bar{z}(\mathbf{x}))^2} \quad (9)$$

G. Proses Pembentukan Minyak dan Gas Bumi

Proses pembentukan minyak dan gas bumi terdapat tiga faktor utama yaitu *Pertama*, ada “bebatuan asal” (source rock) yang secara geologis memungkinkan terjadinya pembentukan minyak dan gas bumi. *Kedua*, adanya perpindahan (*migrasi*) hidrokarbon dari bebatuan asal menuju ke “bebatuan reservoir” (reservoir rock), umumnya sandstone atau limestone yang berpori-pori (porous) dan ukurannya cukup untuk menampung hidrokarbon tersebut. *Ketiga*, adanya jebakan (*entrapment*) geologis.

Untuk mendapatkan minyak dan gas bumi harus melalui beberapa tahapan yaitu meliputi *prospecting* (penyelidikan umum), *exploration* (eksplorasi), *evaluation* (studi kelayakan), *mine plant design & finance* (desain pabrik dan biaya), *development* (persiapan),

exploitation (penambangan), dan *processing* (pengolahan). Dari tahapan-tahapan tersebut eksplorasi merupakan sebuah tahapan dasar yang menentukan keberhasilan suatu kegiatan pertambangan migas [9]. Eksplorasi merupakan tahapan untuk mengestimasi atau menaksir letak dan jumlah cadangan endapan minyak dan gas bumi tersebut.

Anjungan lepas pantai atau *offshore platform* merupakan struktur atau bangunan yang di bangun di lepas pantai untuk mendukung proses eksplorasi atau eksploitasi bahan tambang maupun mineral alam.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder mengenai produksi minyak dan gas bumi di Kalimantan Utara pada tahun 2015, yang diperoleh dari Perusahaan Minyak dan Gas Bumi di Kalimantan Utara. Struktur data yang digunakan merupakan data bulanan dari produksi minyak dan gas bumi yakni selama 12 bulan.

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah variabel produksi minyak dan gas bumi yang diambil dari 9 titik sumur pengamatan. Selain itu terdapat variabel koordinat 9 titik sumur pengamatan yang dinyatakan dalam koordinat UTM. Tabel 1 menunjukkan koordinat dari 9 titik sumur pengamatan.

TABEL 1. KOORDINAT TITIK LOKASI SUMUR

Lokasi Sumur	Easting	Northing
A1	575557,68	9998077,30
A2	575552,10	9998072,49
A3	575552,97	9998073,23
A4	575554,23	9998068,97
A5	575559,38	9998071,55
A6	575558,97	9998073,01
A7	575559,77	9998074,71
A8	575557,78	9998075,70
A9	575554,52	9998073,79

Tahapan dan langkah-langkah dalam analisis data menggunakan metode *cokriging* adalah sebagai berikut.

1. Mendeskripsikan karakteristik produksi minyak dan gas bumi.
2. Melakukan estimasi dengan metode *cokriging*. Jumlah produksi minyak bumi menjadi variabel primer dan jumlah produksi gas bumi sebagai variabel sekunder.
 - a. Melakukan pengujian stasioneritas data.
Pengujian stasioner dilakukan untuk melihat ada tidaknya *trend* pada data melalui dipenuhi tidaknya asumsi stasioner orde dua. Jika plot pada kedua data tidak menunjukkan adanya *trend* tertentu maka data spasial telah memenuhi asumsi stasioner orde dua.
 - b. Melakukan perhitungan variogram eksperimental pada masing-masing variabel, serta *cross-variogram* antara jumlah produksi minyak bumi dan gas bumi.
 - c. Melakukan analisis variogram isotropi teoritis dengan cara membuat model variogram Linier, *Exponential*, *Spherical*, dan *Gaussian*.
 - d. Melakukan analisis struktural (*fitting variogram*) dengan mencocokkan nilai *cross variogram* eksperimental dengan variogram teoritis untuk mendapatkan model variogram teoritis terbaik berdasarkan nilai *Residual Sum of Square* (RSS) yang terkecil.
 - e. Melakukan interpolasi *cokriging* menggunakan variogram teoritis terpilih dan akan menghasilkan peta kontur estimasi produksi minyak bumi.

f. Melakukan cross validasi dengan melihat R^2 yang diperoleh, semakin besar nilai R^2 yang diperoleh maka semakin baik hasil interpolasi.

3. Melakukan estimasi produksi gas bumi dengan metode *cokriging*. Variabel produksi gas bumi menjadi variabel primer dan jumlah produksi minyak bumi sebagai variabel sekunder. Langkah-langkah interpolasi *cokriging* sama dengan langkah poin (a) sampai (f) pada langkah 2.
4. Melakukan estimasi produksi minyak dan gas bumi pada titik tertentu di wilayah studi berdasarkan hasil interpolasi *cokriging* terbaik.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Produksi Minyak dan Gas Bumi

Produksi minyak dan gas bumi yang dihasilkan tiap sumur mempunyai karakteristik yang berbeda. Karakteristik produksi minyak dan gas bumi ditampilkan dalam Tabel 3.

TABEL 3. KARAKTERISTIK PRODUKSI MINYAK DAN GAS BUMI

Lokasi Sumur	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Standar Deviasi
Minyak Bumi (bbls)				
A1	2.117	3.927	2.942	585
A2	1.249	4.670	2.679	1.066
A3	706	2.283	1.384	475
A4	2.315	7.677	5.541	1.508
A5	629	5.455	3.024	1.422
A6	665	3.990	2.385	1.205
A7	1.551	2.403	2.022	263
A8	96	729	203	168
A9	1.425	2.078	1.657	228
Gas Bumi (mscf)				
A1	750	10.461	4.524	3.311
A2	2.889	15.395	9.167	4.029
A3	32	7.962	1.614	2.759
A4	4.421	14.052	8.175	3.547
A5	2.852	27.089	16.008	8.596
A6	1.396	18.393	10.388	7.057
A7	375	9.373	3.914	3.834
A8	2.560	7.428	3.783	1.467
A9	2.425	7.658	5.126	1.923

Keterangan:

bbls = barrels

mscf = million standart cubic feet

Produksi minyak bumi terendah yang ditunjukkan dengan nilai minimum sebesar 96 bbls yang terdapat pada lokasi sumur A8. Sedangkan untuk produksi gas bumi terendah sebesar 32 mscf yang terdapat pada lokasi sumur A3. Produksi minyak bumi tertinggi yang ditunjukkan dengan nilai maksimum sebesar 7.677 bbls yang terdapat pada lokasi sumur A4. Sedangkan untuk produksi gas bumi tertinggi sebesar 27.089 mscf yang terdapat pada lokasi sumur A5. Rata-rata produksi minyak bumi tertinggi selama satu tahun sebesar 5.541 bbls yang berada A4. Sedangkan rata-rata produksi gas bumi tertinggi selama satu tahun sebesar 16.008 msc yang berada dilokasi sumur A5. Penyebaran produksi minyak dan gas bumi selama satu tahun dapat dilihat dari nilai standar deviasi. Standar deviasi produksi minyak bumi yang tertinggi sebesar 1.508 bbls yang berada di lokasi sumur A4. Nilai standar deviasi tersebut relatif tinggi, yang menunjukkan bahwa penyebaran produksi minyak bumi di lokasi sumur A4 sangat bervariasi. Sedangkan standar deviasi produksi gas bumi yang tertinggi sebesar 8.596 mscf yang berada di lokasi sumur A5. Nilai standar

deviasi pada produksi gas bumi tersebut juga relatif tinggi, yang menunjukkan bahwa penyebaran produksi minyak bumi di lokasi sumur A5 sangat bervariasi.

B. Stasioneritas

Interpolasi *cokriging* yang akan digunakan untuk mengestimasi nilai produksi minyak dan gas bumi membutuhkan pemenuhan asumsi stasioneritas atau homogenitas spasial. Pemenuhan asumsi stasioneritas atau homogenitas spasial pada data produksi minyak dan gas bumi telah terpenuhi karena lokasi penelitian berada pada lingkup zona yang memiliki struktur batuan karbonat yang sama, maka dipastikan nilai rata-rata dari masing-masing variabel pada lokasi penelitian telah stasioner.

C. Interpolasi Cokriging untuk Estimasi Produksi Minyak Bumi

Pada interpolasi *cokriging* untuk mengestimasi produksi minyak bumi, variabel minyak bumi sebagai variabel primer dan variabel gas bumi sebagai variabel sekunder. Sebelum melakukan interpolasi *cokriging* terlebih dahulu dilakukan perhitungan semivariogram eksperimental terhadap masing-masing variabel dan cross-variogram. Langkah selanjutnya yaitu melakukan analisis variogram teoritis. Variogram yang digunakan pada penelitian ini adalah variogram isotropi teoritis yakni model *linier*, *spherical*, *exponential*, dan *gaussian*. Variogram isotropi hanya bergantung pada jarak (h) saja dengan tidak mempertimbangkan arah. Perubahan data minyak dan gas bumi tidak dipengaruhi oleh arah. Setelah dilakukan analisis variogram teoritis selanjutnya melakukan analisis struktural (*fitting variogram*) dengan mencocokkan nilai *cross variogram* eksperimental dengan variogram teoritis untuk mendapatkan model variogram teoritis terbaik, berdasarkan nilai *Residual Sum of Square* (RSS) yang terkecil.

Tabel 4 menunjukkan model variogram isotropi teoritis terbaik untuk minyak bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $1,89 \times 10^{16}$. Pada model ini minyak bumi mencapai *sill* pada range 4,38 meter yang berarti minyak bumi tidak akan memiliki dependensi lagi pada saat jarak 4,38 meter atau lebih. Berdasarkan rasio *nugget-sill* variogram isotropi teoritis pada minyak bumi termasuk dalam autokorelasi spasial kuat yaitu sebesar 0,119 persen, yang mengindikasikan adanya kontinuitas spasial pada jarak yang pendek.

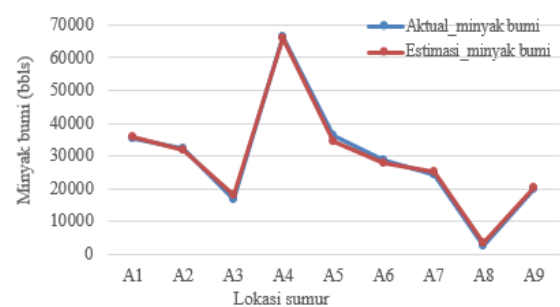
TABEL 4. NILAI PARAMETER DAN RSS VARIOGRAM ISOTROPI TOERITIS MINYAK BUMI

Model	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (A_0)	RSS
Minyak Bumi				
Linier	1.000.000,00	48.043,77	6,13	$2,34 \times 10^{17}$
Spherical	1.000.000,00	513.000.000,00	8,81	$2,24 \times 10^{16}$
Exponential	1.000.000,00	513.000.000,00	4,40	$2,78 \times 10^{16}$
Gaussian	64.000.000,00	539.000.000,00	4,38	$1,89 \times 10^{16}$
Gas Bumi				
Linear	1.229.720.645,06	3.536.393.861,28	4,30	$1,09 \times 10^{18}$
Spherical	10.000.000,00	3.346.000.000,00	3,71	$4,89 \times 10^{17}$
Exponential	10.000.000,00	4.107.000.000,00	2,31	$8,00 \times 10^{17}$
Gaussian	10.000.000,00	3.445.000.000,00	1,84	$4,07 \times 10^{17}$
Minyak Bumi x Gas Bumi				
Linear	1.000.000,00	85.419,87	4,72	$9,11 \times 10^{17}$
Spherical	1.000.000,00	813.000.000,00	6,34	$9,34 \times 10^{15}$
Exponential	1.000.000,00	813.000.000,00	2,84	$2,94 \times 10^{16}$

Gaussian	1.000.000,00	813.000.000,00	2,83	$1,84 \times 10^{14}$
----------	--------------	----------------	------	-----------------------

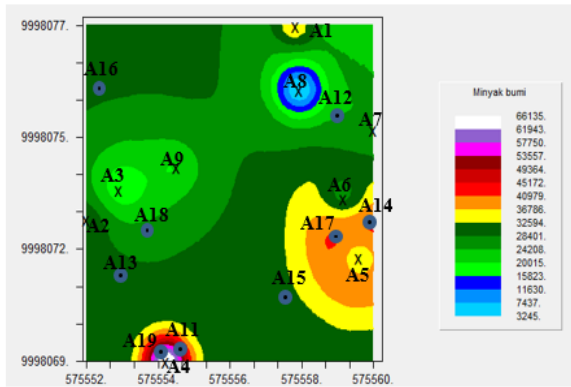
Model variogram isotropi teoritis terbaik untuk gas bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $4,07 \times 10^{17}$. Pada model ini gas bumi mencapai *sill* pada range yang lebih kecil bila dibandingkan minyak bumi yakni sebesar 1,84 meter yang berarti gas bumi tidak akan memiliki dependensi lagi pada saat jarak 1,84 meter atau lebih. Berdasarkan rasio *nugget-sill* variogram isotropi teoritis pada gas bumi termasuk dalam autokorelasi spasial kuat yaitu sebesar $2,902 \times 10^{-3}$ persen, yang mengindikasikan adanya kontinuitas spasial pada jarak yang pendek. Model variogram isotropi teoritis terbaik untuk cross-variogram minyak bumi dan gas bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $1,84 \times 10^{14}$. Pada model terpilih untuk cross-variogram, terdapat dependensi antara minyak dan gas bumi pada jarak 2,83 meter, diatas jarak 2,83 meter tidak terdapat dependensi lagi diantara keduanya.

Variogram dan cross-variogram teoritis yang terpilih tersebut, selanjutnya digunakan untuk melakukan interpolasi *cokriging*. Keakuratan nilai estimasi dan kesesuaian model yang dihasilkan dari interpolasi *cokriging* dapat dilihat dari nilai R^2 pada cross validasi. Nilai R^2 yang dihasilkan sebesar 99,7%. Nilai R^2 ini sangat tinggi, sehingga hasil interpolasi sangat akurat. Keakuratan hasil estimasi juga dapat dilihat melalui plot antara data aktual dan data estimasi minyak bumi. Gambar 3 menunjukkan bahwa antara garis nilai estimasi minyak bumi berhimpit dengan nilai aktual minyak bumi, sehingga selisih keduanya tidak jauh berbeda.



Gambar 3. Perbandingan nilai estimasi dan nilai aktual minyak bumi.

Estimasi penyebaran produksi minyak bumi di tiap titik koordinat sumur disajikan pada Gambar 4 dalam bentuk peta 2 dimensi. Hasil interpolasi *cokriging* menghasilkan range produksi minyak bumi yang bervariasi yakni antara 3.245 bbbls sampai 66.135 bbbls yang dikelompokkan menjadi 15 interval dan ditunjukkan dengan gradasi warna yang berbeda. Daerah yang ditandai X adalah titik pengukuran produksi minyak bumi di lapangan. Hasil Estimasi minyak bumi didominasi pada interval 15.823 bbbls hingga 32.594 bbbls yang ditunjukkan oleh gradasi warna hijau. Nilai hasil interpolasi *cokriging* pada titik koordinat sumur baru disajikan pada Tabel 5. Nilai estimasi produksi minyak bumi di titik koordinat sumur baru terendah terdapat di koordinat sumur A12 sebesar 26.702 bbbls dan produksi minyak bumi tertinggi berada di koordinat sumur A19 sebesar 61.055 bbbls.



Gambar 4. Penyebaran estimasi minyak bumi dengan interpolasi cokriging.

TABEL 5. HASIL ESTIMASI MINYAK BUMI DI 9 TITIK BARU

Lokasi Sumur	Easting	Northing	Estimasi Gas Bumi (mscf)
A11	575555,88	9998069,46	54.825
A12	575558,34	9998075,14	26.702
A13	575553,33	9998071,28	29.594
A14	575560,10	9998072,06	40.857
A15	575557,54	9998070,97	30.308
A16	575552,98	9998076,32	29.275
A17	575559,13	9998073,51	41.291
A18	575554,45	9998073,17	27.660
A19	575554,91	9998069,46	61.055

D. Interpolasi Cokriging untuk Estimasi Produksi Gas Bumi

Langkah-langkah yang digunakan untuk interpolasi cokriging produksi gas bumi sama dengan langkah-langkah yang digunakan untuk melakukan interpolasi cokriging produksi minyak bumi, hanya saja yang membedakan adalah pemilihan variabel primer dan sekunder. Pada interpolasi cokriging untuk mengestimasi produksi gas bumi, variabel gas bumi sebagai variabel primer dan minyak bumi sebagai variabel sekunder.

Tabel 6 menunjukkan model variogram isotropi teoritis terbaik untuk gas bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $4,07 \times 10^{17}$. Pada model ini gas bumi mencapai *sill* pada range sebesar 1,84 meter yang berarti gas bumi tidak akan memiliki dependensi lagi pada saat jarak 1,84 meter atau lebih. Berdasarkan rasio *nugget-sill* variogram isotropi teoritis pada gas bumi termasuk dalam autokorelasi spasial kuat yaitu sebesar $2,902 \times 10^{-3}$ persen, yang mengindikasikan adanya kontinuitas spasial pada jarak yang pendek.

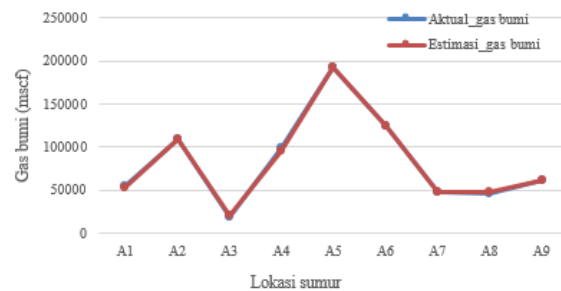
TABEL 6. NILAI PARAMETER DAN RSS VARIOGRAM ISOTROPI TOERITIS GAS BUMI

Model	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (A_0)	RSS
Gas Bumi				
Linear	1.229.720.645,06	3.536.393.861,28	4,30	$1,09 \times 10^{18}$
Spherical	10.000.000,00	3.346.000.000,00	3,71	$4,89 \times 10^{17}$
Exponential	10.000.000,00	4.107.000.000,00	2,31	$8,00 \times 10^{17}$
Gaussian	10.000.000,00	3.445.000.000,00	1,84	$4,07 \times 10^{17}$
Minyak Bumi				
Linier	1.000.000,00	48.043,77	6,13	$2,34 \times 10^{17}$
Spherical	1.000.000,00	513.000.000,00	8,81	$2,24 \times 10^{16}$
Exponential	1.000.000,00	513.000.000,00	4,40	$2,78 \times 10^{16}$
Gaussian	64.000.000,00	539.000.000,00	4,38	$1,89 \times 10^{16}$
Gas Bumi x Minyak Bumi				
Linear	1.000.000,00	85.419,87	4,72	$9,11 \times 10^{17}$

Spherical	1.000.000,00	813.000.000,00	6,34	$9,34 \times 10^{15}$
Exponential	1.000.000,00	813.000.000,00	2,84	$2,94 \times 10^{16}$
Gaussian	1.000.000,00	813.000.000,00	2,83	$1,84 \times 10^{14}$

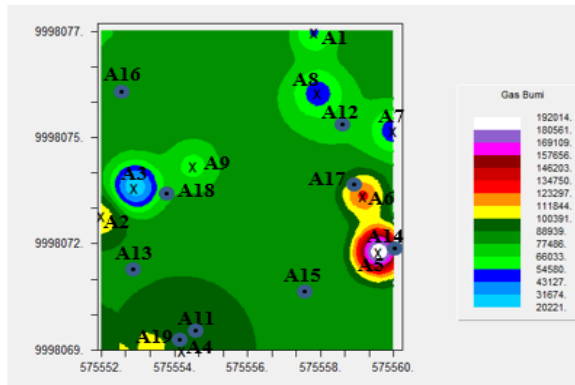
Model variogram isotropi teoritis terbaik untuk minyak bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $1,89 \times 10^{16}$. Pada model ini minyak bumi mencapai *sill* pada range 4,38 meter yang berarti minyak bumi tidak akan memiliki dependensi lagi pada saat jarak 4,38 meter atau lebih. Berdasarkan rasio *nugget-sill* variogram isotropi teoritis pada minyak bumi termasuk dalam autokorelasi spasial kuat yaitu sebesar 0,119 persen, yang mengindikasikan adanya kontinuitas spasial pada jarak yang pendek. Model variogram isotropi teoritis terbaik untuk cross-variogram gas dan minyak bumi adalah model gaussian dengan nilai RSS terkecil sebesar $1,84 \times 10^{14}$. Pada model terpilih untuk cross-variogram, terdapat dependensi antara gas dan minyak bumi pada jarak 2,83 meter, diatas jarak 2,83 meter tidak terdapat dependensi lagi diantara keduanya.

Variogram dan cross-variogram teoritis yang terpilih tersebut, selanjutnya digunakan untuk melakukan interpolasi cokriging. Keakuratan nilai estimasi dan kesesuaian model yang dihasilkan dari interpolasi cokriging dapat dilihat dari nilai R^2 pada cross validasi. Nilai R^2 yang dihasilkan sebesar 99,9%. Nilai R^2 ini sangat tinggi sehingga hasil interpolasi sangat akurat. Keakuratan hasil estimasi juga dapat dilihat melalui plot antara nilai aktual dan nilai estimasi minyak bumi yang dihasilkan dari cross validasi. Gambar 5 menunjukkan bahwa antara garis data kestimasi minyak bumi berhimpit dengan data aktual minyak bumi, sehingga selisih keduanya tidak jauh berbeda.



Gambar 5. Perbandingan nilai estimasi dan nilai aktual gas bumi.

Estimasi penyebaran produksi gas bumi di tiap titik koordinat sumur disajikan pada Gambar 6 dalam bentuk peta 2 dimensi. Hasil interpolasi cokriging menghasilkan range produksi gas bumi yang bervariasi yakni antara 20.221 mscf sampai 192.014 mscf yang dikelompokkan menjadi 15 interval dan ditunjukkan dengan gradasi warna yang berbeda. Daerah yang ditandai X adalah titik pengukuran produksi gas bumi di lapangan. Hasil Estimasi gas bumi didominasi pada interval 88.939 mscf hingga 100.391 mscf yang ditunjukan oleh gradasi warna hijau. Nilai hasil interpolasi cokriging pada titik koordinat sumur baru disajikan pada Tabel 7. Nilai estimasi produksi gas bumi di titik koordinat sumur baru tertinggi terdapat di koordinat sumur A14 sebesar 165.095 mscf dan produksi gas bumi terendah berada di koordinat sumur A12 sebesar 71.826 mscf.



Gambar 6. Penyebaran estimasi gas bumi dengan interpolasi *cokriging* peta 2 dimensi.

TABEL 7. HASIL ESTIMASI GAS BUMI DI 9 TITIK BARU

Lokasi Sumur	Easting	Northing	Estimasi Gas Bumi (mscf)
A11	575555,88	9998069,46	95.873
A12	575558,34	9998075,14	71.826
A13	575553,33	9998071,28	87.643
A14	575560,10	9998072,06	165.095
A15	575557,54	9998070,97	84.485
A16	575552,98	9998076,32	84.920
A17	575559,13	9998073,51	115.209
A18	575554,45	9998073,17	73.855
A19	575554,91	9998069,46	96.724

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Lokasi sumur A4 merupakan lokasi dengan jumlah produksi dan rata-rata produksi minyak bumi tertinggi. Selain itu, penyebaran jumlah minyak bumi yang dihasilkan di lokasi sumur A4 selama satu tahun sangat bervariasi. Sedangkan untuk lokasi sumur A5 merupakan lokasi dengan jumlah produksi dan rata-rata produksi gas bumi tertinggi. Penyebaran jumlah produksi gas bumi yang dihasilkan oleh sumur A5 selama satu tahun sangat bervariasi.

Hasil estimasi produksi minyak bumi tertinggi sebesar 61.055 bbls yang berada di lokasi sumur A19 dan hasil estimasi produksi minyak bumi terendah sebesar 26.702 bbls yang berada di lokasi sumur A12. Hasil estimasi produksi gas bumi tertinggi terdapat di lokasi sumur A14

sebesar 165.095 mscf dan produksi gas bumi terendah berada di koordinat sumur A12 sebesar 71.826 mscf.

Penyebaran estimasi produksi minyak bumi dalam peta 3D dan 2D diperoleh range produksi minyak bumi antara 3.245 bbls sampai 66.135 yang dikelompokkan menjadi 15 interval. Sedangkan penyebaran estimasi produksi gas bumi dalam peta 3D dan 2D diperoleh range produksi gas bumi antara 20.221 mscf sampai 192.014 mscf yang dikelompokkan menjadi 15 interval.

B. Saran

Ada beberapa kekurangan yang diperoleh melalui hasil analisis dan pembahasan, yakni dalam melakukan interpolasi *cokriging* belum dapat membuktikan stasioneritas orde dua secara statistika. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode kriging lain yang lebih sesuai untuk data yang tidak stasioner yaitu dengan metode universal atau *robust kriging*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.(2016).*Kementrian Energi dan Sumber daya Mineral*. <http://esdm.go.id/direktorat-jenderal-minyak-dan-gas.html/>.(tanggal akses: 28 Januari 2016).
- [2] Kelkar, M. dan Perez ,G. (2002) . *Applied Geostatistics for Reservoir Characterizatiton*. USA: Society of Petroleum Engineers.
- [3] Wackernagel, Hans.(1995). *Multivariate Geostatistics, An Introductio*
- [4] LeMay,N. E.(1995). *Variogram Modeling and Estimation*. Thesis Master of Science Applied Mathematics, University of Colorado, Denver.
- [5] Alfiana, A.N.(2010).*Metode Ordinary Kriging Pada Geostatistika*. Skripsi, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
- [6] Amstrong.M. (1998). *Basic Linier Geostatistics*. Springer, Berlin.
- [7] Isaaks, H. E. dan Srivastava, R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- [8] Cressie, N. A. C.(1993). *Statistics for Spatial Data Revised Edition*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Pradnyana,I.K.G.A.(2006). *Estimasi Kandungan Emas dan Perak dengan Metode Ordinary Kriging (Studi Kasus: PT. Aneka Tambang)*. Tugas Akhir, Program Sarjana Jurusan Teknik Informatika Universitas Telkom, Bandung.